

Przegląd Geograficzny

2020, 92, 1, s. 19–39

<https://doi.org/10.7163/PrzG.2020.1.2>Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk<https://www.igipz.pan.pl/przegląd-geograficzny.html>

Wietrzenie mrozowe wybranych skał tatrzańskich w świetle badań laboratoryjnych

Frost weathering of selected Tatra rocks in the light of laboratory tests

Ewa Lubera • Paweł Krzaklewski¹ ¹Stacja Naukowa Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Brzezowa 162, 32-410 Dobczyce

ewa.lubera@uj.edu.pl • pawel.krzaklewski@uj.edu.pl

Zarys treści. Wietrzenie mrozowe jest jednym z rodzajów wietrzenia fizycznego. Celem opracowania jest poznanie zróżnicowania tempa i przebiegu wietrzenia mrozowego oraz tempa i rozmiarów odpadania materiału ze ścian skalnych na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych. Zróżnicowanie typów skał tatrzańskich, skład mineralny, ich uszczelnienie, zróżnicowana nasiąkliwość, porowatość decydują o przebiegu procesu, odmiennych efektach i produktach wietrzenia. Skutkiem wietrzenia jest rozluźnianie i stopniowe rozdrabnianie skały na mniejsze fragmenty. Próbkę skalną, przeznaczone do badań laboratoryjnych reprezentowały utwory różnego wieku i różnych jednostek geologicznych Tatr Zachodnich. Przeprowadzone badania laboratoryjne symulują procesy zachodzące w warunkach naturalnych pozwalają na analizę cech fizycznych skał. Na podstawie wyliczonego wskaźnika wietrzenia mrozowego wyznaczono skały o najmniejszej i największej odporności na wietrzenie mrozowe. Na znaczną odporność badanych skał tatrzańskich wpływa niewielka porowatość otwarta, niska nasiąkliwość i zwięzłość skał, dobre wysortowanie ziaren skalnych, małe spękanie prób w stanie wyjściowym, obecność spoiwa zapęniającego niemal całkowicie pory skalne. Wpływ tekstury na rozpad skał nie został zaobserwowany, natomiast występowanie żył mineralnych w skale, determinuje ich sposób rozpadu, co miało miejsce w próbach zlepieńca drobnoziarnistego.

Słowa kluczowe: wietrzenie mrozowe, Tatry Zachodnie, symulacja laboratoryjna.

Wstęp

Wietrzenie jest procesem uniwersalnym, występującym na całym globie, a zróżnicowane warunki środowiska decydują o różnym przebiegu procesu, odmiennych efektach i produktach wietrzenia.

Wietrzenie fizyczne prowadzi do zmian cech fizycznych skał bez zmian składu mineralogicznego i chemicznego. W wyniku wietrzenia fizycznego następuje rozluźnianie i stopniowe rozdrabnianie skały na mniejsze fragmenty, od dużych bloków po ziarna pyłu. Widocznym przejawem wietrzenia fizycznego jest otwieranie się istniejących powierzchni nieciągłości tj. spękania, powierzchnie uławicenia, powierzchnie kontaktu między minerałami oraz powstawanie nowych (Migoń, 2006). Do głównych przyczyn wietrzenia mechanicznego należą zmiany termiczne skał, zmiany wilgotności skał, zmiany naprężeń w skałach oraz wzrost obcych kryształów w szczelinach i porach skał (Witt i Borówka, 1997).

Wietrzenie fizyczne zmienia cechy materiału podlegającego transportowi, a od składu mechanicznego produktów wietrzenia mrozowego zależy sposób ich przemieszczania po stoku, a tym samym jego modelowania (Tricart, 1960). Wietrzenie mrozowe jest szczególnie istotnym procesem w obszarach peryglacjalnych (Rączkowska, 2007). Podatność skał na wietrzenie mrozowe zależy głównie od:

- warunków klimatycznych – przede wszystkim zmienności temperatury powietrza i wilgotności;
- właściwości skał – składu mineralnego, stopnia związania minerałów, tekstury, spoiwa, porowatości, systemu spękań, wytrzymałości skały;
- warunków orograficznych i ekspozycji;
- czasu oddziaływania poszczególnych czynników morfogenetycznych (Migoń, 2006).

Istnieje kilka teorii wyjaśniających w jaki sposób wietrzenie mrozowe doprowadza do rozpadu skał (Bland i Rolls, 1998).

- a) Zamarzanie wody znajdującej się w spękaniach przebiega od powierzchni szczeliny w głąb. Lód przy powierzchni tworzy swego rodzaju plombę, powstaje zamknięty system, w którym wzrost objętości wody przy zamianie na lód powoduje powstanie dużego ciśnienia i doprowadza do rozpadu skały. Warunkiem koniecznym, aby zostało wytworzone wystarczająco duże ciśnienie jest osiągnięcie tempa zamarzania ponad $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ i znacznych temperatur ujemnych.
- b) Migracja wody w kierunku formujących się soczewek lodu, w wyniku różnic potencjału termodynamicznego, doprowadzająca do powstania wysokiego ciśnienia i rozpadu skały. Warunkiem koniecznym do zainicjowania procesu jest osiągnięcie temperatur z zakresu od -5°C do -15°C oraz tempa zamarzania poniżej $0,1-0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$, przy których odnotowano najszybszy rozwój szczelin.
- c) Pojedyncze cząsteczki wody zawartej w szczelinach lub porach skalnych, zostają zorientowane w stosunku do naładowanej powierzchni minerałów, w taki sposób, że jeden koniec wiąże się z powierzchnią minerału, a drugi oddala się. W temperaturach ujemnych bliskich zera, cząsteczki mogą nie zamarznąć i nie zostać przeorientowane. Odpychanie elektrostatyczne zachodzi w wąskich szczelinach i porach o małej średnicy, gdy zbliżą się do siebie wolne bieguny cząsteczek o jednakowym ładunku, zlokalizowane po przeciwnych ścianach szczeliny. Odpychanie elektrostatyczne wzrasta wraz ze spadkiem temperatury i prowadzi do uszkodzeń skały.
- d) Zamarzanie powierzchni skały, która wcześniej miała kontakt z wodą, tworzy barierę dla migracji wody. W następnej kolejności zamarza woda zawarta w porach skalnych blisko jej powierzchni, a cząsteczki o zwiększonej objętości wypychają pozostałą niezamarzniętą wodę w głąb skały. W przypadku skał o wystarczającej odporności na tarcie, przemieszczających się cząsteczek wody, może dojść do rozpadu skały. Dzieje się tak na skutek powstawania wysokiego ciśnienia hydraulicznego (Bland i Rolls, 1998).

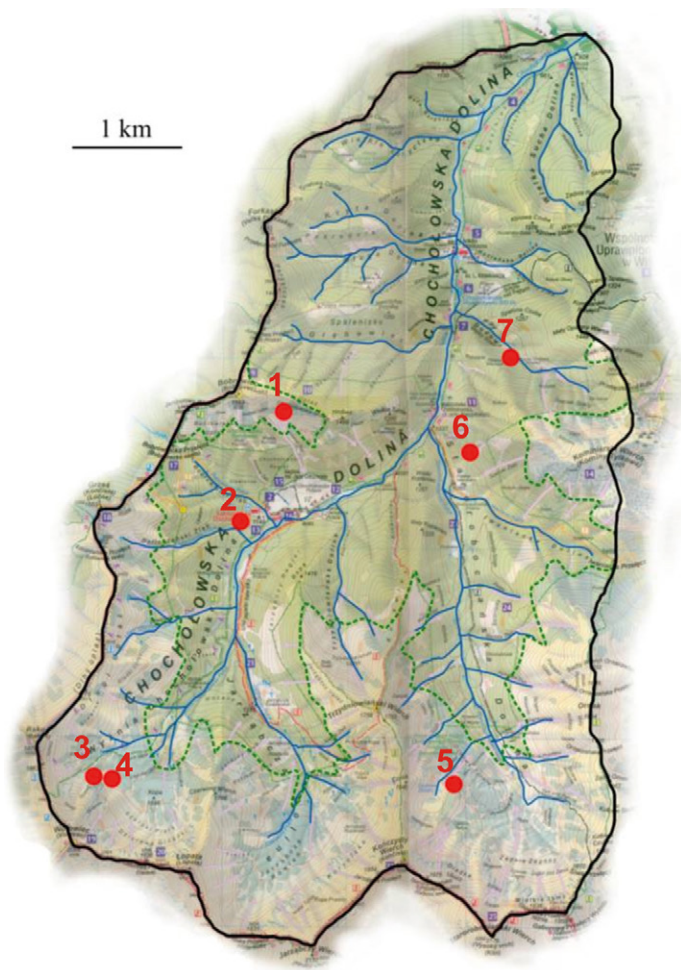
Obszar badań

Próbki skalne, przeznaczone do badań laboratoryjnych, zostały pobrane w Dolinie Chochołowskiej. Jest to dolina walna, najbardziej wysunięta na zachód i największa z dolin w polskiej części Tatr. Jej powierzchnia wynosi $35,6 \text{ km}^2$, a długość $9,7 \text{ km}$ (Klimaszewski,

1988). Dolina Chochołowska graniczy od zachodu z odgałęzieniami Doliny Cichej Orawskiej: Bobrowiecką, Juraniową i Furkaską oraz z Doliną Rohacką i Łataną należącymi do systemu Doliny Zuberskiej, od południa z Doliną Jamnicką i Raczkową, natomiast od wschodu sąsiaduje z Doliną Kościeliską i Doliną Lejową.

Próby skalne pobrano w 7 lokalizacjach – na Mnichach Chochołowskich, na stokach Grzesia, Wołowca (2 próby), na Dudowych Turniach, na stokach Kominiarskiego Wierchu oraz w Dolinie Dudowej (ryc. 1).

Badanie odporności na wietrzenie mrozowe przeprowadzono dla 7 typów skał – brekcji dolomitowych, wapieni organodetrytycznych, zlepieńców drobnoziarnistych, piaskowców kwarcytowych, granitów białych, granitów brązowych oraz amfibolitów (tab. 1, ryc. 1).



Ryc. 1. Lokalizacja miejsc poboru prób skalnych: 1 – brekcja dolomitowa, 2 – piaskowiec kwarcytowy, 3 – granit biały, 4 – amfibolit, 5 – granit brązowy, 6 – zlepieńiec drobnoziarnisty, 7 – wapień organodetrytyczny
Location of sites for the collection of rock samples: 1 – dolomite breccia, 2 – quartzite sandstone, 3 – white granite, 4 – amphibolite, 5 – brown granite, 6 – fine-grained conglomerate, 7 – organodetrital limestone
Opracowanie własne na podstawie Siwicki (2005) / Authors' own elaboration based on Siwicki (2005).

Tabela 1. Miejsca poboru prób skalnych do badania odporności wybranych typów skał na wietrzenie mrozowe
Sites for the collection of rock samples used to test resistance of selected types to frost weathering

Nr próby	Lokalizacja	Wysokość n.p.m.	Litologia
1	Mnichy Chochotowskie	1465	brekcja dolomitowa
2	Grześ	1175	piaskowiec kwarcytowy
3	Wołowiec	1635	granit biały
4	Wołowiec	1630	amfibolit
5	Dudowe Turnie	1645	granit brązowy
6	Kominiarski	1115	zlepieniec drobnziarnisty
7	Dolina Dudowa	1125	wapień organodetrytyczny

Metody badań

W skład przeprowadzonych badań wchodziły analizy laboratoryjne właściwości fizycznych wybranych skał tatrzańskich oraz symulacja wietrzenia mrozowego w warunkach laboratoryjnych.

Pobór prób skalnych

Z każdego z 7 typów bloków skalnych, wycięto 5–6 walcowych rdzeni, o wysokości i średnicy podstawy 5 cm. Z jednego rdzenia, z każdego typu skały, wycięto mniejsze walce (o wysokości 2,5 cm i średnicy 5 cm), przeznaczone do badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Pozostała część materiału posłużyła do określenia porowatości otwartej, gęstości objętościowej oraz do przeprowadzenia analizy petrograficznej i dyfrakcyjnej badanych skał (ryc. 2, 3).

Badania wybranych właściwości petrofizycznych skał

W celu określenia składu mineralnego badanych prób skalnych zostały wykonane szlify, które następnie poddano analizie mikroskopowej. Analizy miały na celu określenie tekstury, struktury skał, typu spoiwa i porowatości, stopnia wypełnienia porów w skale. Dla każdej próby skalnej wykonano rentgenowską analizę dyfrakcyjną, przy zastosowaniu dyfraktometru Philips X’Pert APD. Wykonano również pomiary wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie.

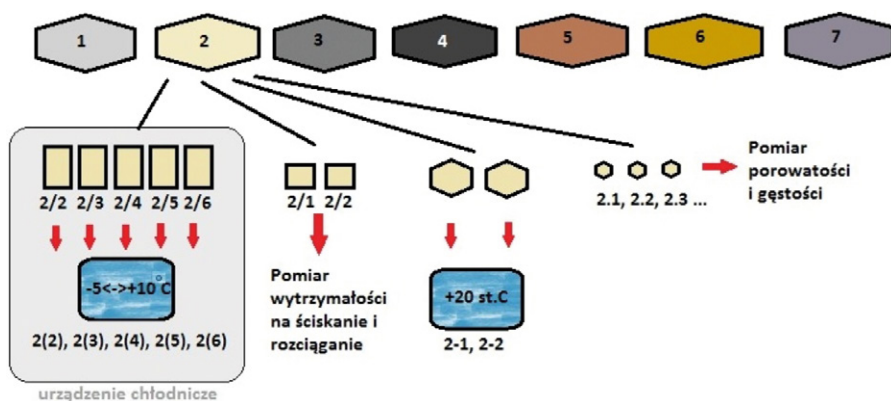
Porowatość prób skalnych oznaczono poprzez zastosowanie metody nasycenia wodą (Chena i inni, 2004). Gęstość objętościowa została wyznaczona przez stosunek masy próby do jej objętości całkowitej oraz uzależniona od gęstości właściwej szkieletu ziarnowego i porowatości skały.

Symulacja wietrzenia mrozowego

Symulację wietrzenia mrozowego przeprowadzono przy zastosowaniu urządzenia chłodniczego model CI/1400/LT/2D, wyposażonego w sterownik temperatury typu STE 3, produkcji



Ryc. 2. Blok i wycięte próby skalne, do symulacji wietrzenia i badań wytrzymałościowych, na przykładzie próby nr 4
Block and cut rock samples, for simulation of weathering and strength tests, as exemplified by sample no. 4



Ryc. 3. Procedura przeprowadzania badań laboratoryjnych, na przykładzie próby nr 2
The procedure for carrying out laboratory tests, as exemplified by sample no. 2

JBG-2. W ciągu doby zachodziły 2 cykle gelacyjne, w zakresie temperatur od -5 do +10°C. Temperatury graniczne były utrzymywane przez 5 h. Próby skalne, zanurzone do wysokości około 2 cm w wodzie destylowanej, umieszczono w plastikowych pojemnikach. W celu ograniczenia zmian wilgotności, w trakcie trwania symulacji, pojemniki pozostawały zakryte.

Podczas trwania symulacji, na bieżąco prowadzone były obserwacje stanu prób i pomiary wytworzonej zwietrzliny. W celu wykrycia zmian zanurzonych próbek, początkowo co około 20 cykli gelacyjnych, później co około 100 cykli, powtarzano pomiar masy próby powietrznie-suchej (m) i nasyconej wodą (m_w), określano nasiąkliwość prób (A_b), wykonywano test ultradźwiękowy, mierzono współczynnik tłumienia (A). Test ultradźwiękowy polega na pomiarze prędkości podłużnej fali akustycznej przechodzącej przez próbkę skalną (Nowakowski i inni, 2003). Wartość prędkości fali podłużnej (V_p) otrzymuje się poprzez podzielenie wysokości próby h przez czas rzeczywisty (t_p), będący różnicą czasu zmierzonego (t_z) i czasu martwego (t_0).

Intensywność wiązki ultradźwiękowej docierającej do odbiornika jest znacznie mniejsza niż intensywność wiązki wysyłanej przez nadajnik. Rozpraszanie fali jest związane z brakiem jednorodności badanego materiału. Nieciągłości struktury tj. pęknięcia, granice ziaren, wytrącenia, pory, prowadzą do odchylenia małych porcji energii ultradźwięko-

wej od głównej wiązki (Baranowska i Garbiak, 1999). Zmniejszenie intensywności wiązki fali jest wyrażone przez współczynnik tłumienia (A). Właściwości akustyczne skał zależą w dużej mierze od właściwości budujących je minerałów, wysokie prędkości są charakterystyczne dla minerałów skałotwórczych (Chrzan, 1994).

Na podstawie uzyskanych wartości V_p można wyliczyć wskaźnik wietrzenia mrozowego (Matsuoka, 1990), umożliwiający porównanie odporności wybranych skał na badany proces. Im niższa wartość wskaźnika R_f tym większa odporność danej skały na oddziaływanie mrozu.

$$R_f = (V_{p0} - V_{pk})/V_{p0} \cdot k \text{ [cykle}^{-1}\text{]}$$

gdzie:

V_{p0} – prędkość fali ultradźwiękowej podłużnej przed rozpoczęciem multigelacji (km/s)

V_{pk} – prędkość fali ultradźwiękowej podłużnej po k cyklach (km/s)

k – liczba cykli gelacyjnych.

Badania produktów wietrzenia mrozowego

Po prawie 900 cyklach gelacyjnych symulacja wietrzenia została zakończona. Okruchy zostały wysuszone w ciągu doby, w temperaturze 105°C. Uzyskaną zwietrzelinę poddano analizie granulometrycznej, przy zastosowaniu wytrząsarki wibracyjnej FRITSCH analysette 3 PRO, w celu określenia zróżnicowania frakcjonalnego okruchów. Amplitudę drgań ustawiono na 0,5 mm, a czas wibracji na 10 min. Określono masę i udział procentowy frakcji żwirowej, piaszczystej, pylastej i ilastej. Pomiarów masy dokonywano z dokładnością do 0,01 g.

Wyniki badań

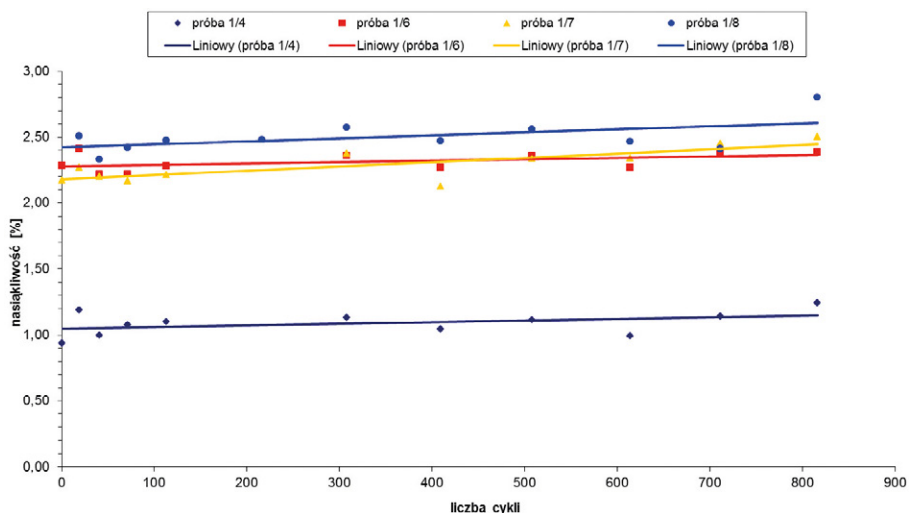
Wybrane właściwości fizyczne badanych skał

Badania laboratoryjne skał wykazały, że próba 1 (brekcja dolomitowa) odznacza się średnią porowatością otwartą 3,87%, próba 2 (piaskowiec kwarcytowy) – 0,69%, 3 (granit biały) – 1,50%, 4 (amfibolit) – 0,36%, 5 (granit brązowy) – 1,90%, 6 (zlepianiec) – 2,59% i 7 (wapień) – 1,17%. Wszystkie badane skały można zaliczyć się do kategorii skał o małej porowatości otwartej, poniżej 5%.

Badania gęstości objętościowej dostarczyły następujących wyników: brekcja dolomitowa (1) – średnia gęstość 2,69 Mg/m³; piaskowiec kwarcytowy (2) – 2,64 Mg/m³; granit biały (3) – 2,60 Mg/m³; amfibolit (4) – 2,87 Mg/m³; granit brązowy (5) – 2,58 Mg/m³; zlepianiec drobnoziarnisty (6) – 2,56; wapień organodetrytyczny (7) – 2,68 Mg/m³.

Wraz z uszkodzaniem struktury prób wzrasta ich nasiąkliwość. W przypadku badanych skał zachodnio tatrzańskich zmiany nasiąkliwości w trakcie trwania symulacji wietrzenia mrozowego, były bardzo nieznaczne. Do skał o najniższej nasiąkliwości należą amfibolity, największą nasiąkliwością odznaczają się dolomity.

Największy wzrost nasiąkliwości skał, w trakcie trwania eksperymentu laboratoryjnego, pomierzono dla prób dolomitowych, o około 0,3%. Nasiąkliwość prób dolomitowych wzrosła od początkowej wartości 0,94–2,28% do 1,14–2,45%, po ponad 700 cyklach gelacyjnych (ryc. 4).



Ryc. 4. Zmiany nasiąkliwości dla próbek dolomitów, w trakcie symulacji wietrzenia mrozowego (przebieg liniowy obrazuje jedynie tendencję zmian)

Changes in absorbability for dolomite samples, during simulation of frost weathering (linear course illustrates only trends characterising changes)

W próbach amfibolitów i zlepieńców wzrost parametru nasiąkliwości wyniósł 0,1–0,2%. W amfibolitach zmienił się, od początkowej wartości 0,05–0,09% do 0,09–0,15%, po ponad 700 cyklach gelacyjnych. W zlepieńcach nasiąkliwość wzrosła od 0,27–0,78% do 0,29–0,82%, po upływie około 700 cykli gelacyjnych.

W piaskowcach, granitach i wapieniach wzrost nasiąkliwości wyniósł około 0,1%. W próbach piaskowcowych nasiąkliwość uległa zwiększeniu, od początkowej wartości 0,19–1,25% do 0,24–0,32%, po prawie 800 cyklach gelacyjnych. W próbach granitowych nasiąkliwość wzrosła od 0,43–0,82% do 0,49–0,92%, po upływie prawie 800 cykli gelacyjnych. W wapieniach organodetrytycznych omawiany parametr uległ bardzo nieznacznym zmianom.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe dostarczyły następujących informacji – skały węglanowe (brekcja dolomitowa i wapień organodetrytyczny) odznaczają się średnią wytrzymałością, amfibolit dużą, a pozostałe typy skał bardzo dużą. Wyjątkowo dużą wytrzymałością odznacza się piaskowiec kwarcytowy, próba nr 2 – 405,3 MPa i zlepieniec drobnziarnisty, próba 6 (tab. 2).

Tabela 2. Wytrzymałość na ściskanie (R_c) i rozciąganie (R_r) badanych skał tatrzańskich
Compressive strength (R_c) and tensile strength (R_r) of the studied Tatra rocks

Próba	1	2	3	4	5	6	7
R_c (MPa)	77,6	405,3	284,2	167,2	217,1	368,2	77,4
R_r (MPa)	7,2	7,4	6,4	13,6	6,8	18,1	5,2

Przebieg symulowanego wietrzenia mrozowego wybranych skał – zmiany makroskopowe

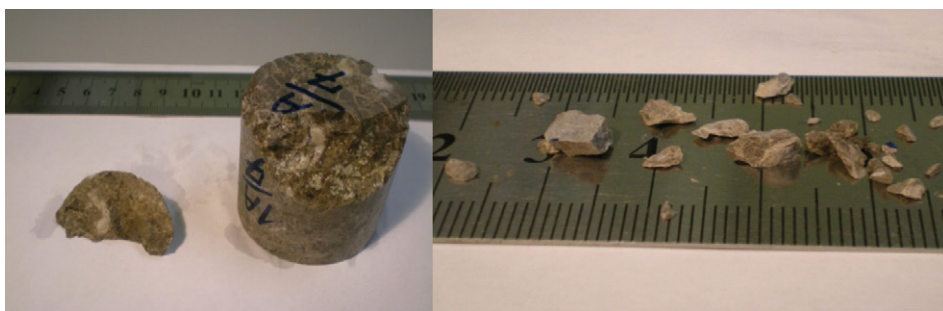
Rozpad prób skalnych, podczas eksperymentu laboratoryjnego, następował najczęściej przez odpadanie okruchów z krawędzi prób skalnych, z powierzchni już wcześniej uszkodzonych. Dochodziło do wykruszania pojedynczych ziaren ze szczelin skalnych, co skutkowało ich poszerzeniem (tab. 3).

Największy rozpad następował w przypadku prób dolomitowych i zachodził od początku symulacji laboratoryjnej. Dochodziło do wykruszania się okruchów skalnych o różnicowanych wymiarach, od poniżej 1 mm średnicy do prawie 2 cm (tab. 3). Zaobserwowano pękanie okruchów, które uprzednio odpadły z próby skalnej. Okruchy skalne były nieregularne i ostrokrawędziste. Największe i najczęściej zmiany zachodziły w próbce 1/7 (ryc. 5).

Tabela 3. Rozpad prób skalnych w trakcie trwania symulacji wietrzenia mrozowego
Breakdown of rock samples during the simulation of frost weathering

Typ skały	Nr próby	Cykl gelacyjny	Rozpad próby zaobserwowany w trakcie symulacji wietrzenia mrozowego
Brekcja dolomitowa	1/4	13	2 okruchy: wymiary 2,0 na 1,0 mm
		71	okruch: wymiary 1,2 na 1,0 na 0,3 cm, oderwany z krawędzi próby
		711	okruchy: wymiary 8 na 4 na 2 mm; 7 na 5 na 3 mm
	1/6	13	okruch: wymiary 4,0 na 6,0 mm
		308	okruch: wymiary 7,0 na 6,0 na 2,0 mm oderwany z krawędzi próby
	1/7	41	5 okruchów o wymiarach od 2,5 mm do 6,0 mm oraz drobniejsze okruchy o średnicy 1,0–1,5 mm
		71	2 okruchy: wymiary 2, 5 na 2,0 mm; 1,0 na 1,0 mm
		149	okruch: wymiary 4,0 na 1,7 na 1,5 cm oderwany z krawędzi próby oraz 15 okruchów o wymiarach od 1,0 mm do 7,0 mm oraz liczne mniejsze okruchy
		409	okruch: wymiary 6,0 na 3,0 na 2,0 mm oraz okruchy do 0,5 mm średnicy
		508	wykruszanie się mniejszych okruchów z okruchu który odpadł z próby wcześniej, pęknięcie odłamka na 2 części
		816	okruchy o wymiarach od 0,2 cm do 1,4 cm oraz liczne okruchy kilkumilimetrowe
	1/8	308	okruch: wymiary 5,0 na 3,0 na 3,0 mm
		816	okruchy o wymiarach od 1 do 4 mm
Płaskowiec kwarcytowy	2/2		brak produktów rozpadu prób skalnych
	2/3		
	2/4		
	2/5		
	2/6		
Granit biały	3/2	84	okruchy: wymiary 3,0 na 1,0 mm; 3,5 na 1,0 mm oraz mniejsze ziarna kwarcu
	3/3	23	osad, wykruszenie ze szczeliny, szczelina poszerzona z 1,0 mm do 1,5 mm
		84	liczne okruchy o wymiarach od 1,0 mm do 4,0 mm oraz mniejsze ziarna kwarcu i blaszki muskowitu
	3/4		brak produktów rozpadu prób skalnych
	3/5		
	3/6	42	3 okruchy: wymiary 9,0 na 6,0 mm; 2,0 na 1,5 mm; 2,0 na 1,5 mm

Amfibolit	4/2		brak produktów rozpadu prób skalnych
	4/3	57	2 okruchy: wymiary 1,5 na 1,0 mm; 1,0 na 1,0 mm
	4/4		brak produktów rozpadu prób skalnych
	4/5		
Granit brązowy	5/2		brak produktów rozpadu prób skalnych
	5/3		
	5/4		
	5/5		
Zlepieniec drobnziarnisty	6/4	18 700	liczne okruchy: wymiary max 1,0 na 1,5 mm, większość mniejszych okruchy: wymiary 1,1 na 0,7 na 0,3 cm; 1,2 na 0,4 na 0,1 cm; 4 na 3 na 3 mm
	6/5	3 18	osad-ziarna o średnicy poniżej 0,5 mm liczne okruchy: wymiary max 1,0 na 1,5 mm, większość mniejszych
	6/7	48 398	okruch: wymiary 3,7 na 1,8 na 1,3 cm okruchy o wymiarach od 1,00 mm do 6 mm
	6/8	805	rozpad próby na dwie części
	6/9		brak produktów rozpadu prób skalnych
Wapień organodetrytyczny	7/1	60 704	okruch: wymiary 1,0 cm na 0,6 cm na 0,6 cm okruchy o wymiarach od 0,6 mm do 5 mm
	7/2		brak produktów rozpadu prób skalnych
	7/5	3	ziarna o średnicy do 0,5 mm
		18	liczne okruchy: wymiary max 1,0 na 1,5 mm, większość mniejszych
		38	okruchy: wymiary 3,0 na 2,0 mm; 2,0 na 0,5 mm, mniejsze odłamki o średnicy 1,0 mm i poniżej
		60	6 okruchów o wymiarach od 0,5 mm do 2 mm
	7/7		brak produktów rozpadu prób skalnych



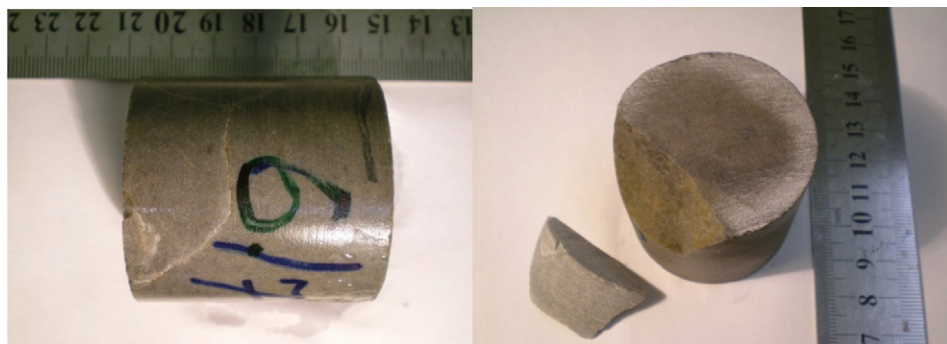
Ryc. 5. Stan próby 1/7 – brekcja dolomitowa po 149 cyklach gelacyjnych
Condition of sample 1/7 (dolomite breccia) after 149 gelation cycles

Z piaskowców kwarcytowych wykruszały się jedynie pojedyncze ziarna kwarcu, o średnicy poniżej 0,5 mm. Makroskopowych zmian również nie zaobserwowano w próbach amfibolitów, wyjątek stanowiła próba 4/3, z której wykruszyły się okruchy o średnicy 1–1,5 mm (tab. 3).

Rozpad badanych granitów tatrzańskich zachodził w odmienny sposób, w zależności od typu granitu. Granity brązowe nie podlegały istotnym zmianom makroskopowym. Próby granitów białych ulegały niewielkiemu rozpadowi, w wyniku wykruszania blaszek muskowitów, ziaren kwarcu i okruchów skalnych o wymiarach kilkumilimetrowych, maksymalnie do 1 cm. Rozpad następował w pierwszych 100 cyklach gelacyjnych, później nie zaobserwowano istotnych zmian (tab. 3).

Rozpad zlepieńców drobnoziarnistych był wyraźny, zachodził poprzez wykruszanie się licznych okruchów o zróżnicowanych wymiarach, od kilku mm do 2 cm. Rozpad następował stopniowo, w trakcie trwania eksperymentu laboratoryjnego (tab. 3). Zaobserwowano także, iż nawiązywał on do przebiegu żył kalcytowych (ryc. 6, 7).

Rozpad wapieni organodetrytycznych zachodził głównie w pierwszych 100 cyklach gelacyjnych. Dochodziło do odpadania licznych okruchów skalnych, o wymiarach od poniżej 0,5 mm do prawie 1,5 cm. Okruchy były ostrokrawędziste i nieregularne (tab. 3).



Ryc. 6. Stan próby 6/7 – zlepieniec drobnoziarnisty, na początku symulacji i po 48 cyklach
Condition of sample 6/7 – fine grained aggregate, at the beginning of the simulation and after 48 cycles



Ryc. 7. Rozpad próby 6/8 – zlepieńca drobnoziarnistego, 805 cykli
Disintegration of sample 6/8 – fine-grained conglomerate, 805 cycles

Uszkodzenia badanych skał na podstawie pomiarów prędkości fali ultradźwiękowej

Po ponad 800 cyklach, w próbach dolomitowych (nr 1) nastąpił wyraźny spadek prędkości fali ultradźwiękowej (V_p) od początkowej wartości 3,97–4,40 do 2,91–3,08. Największy spadek odnotowano w przypadku próby 1/7 (ryc. 8). Wyraźny spadek prędkości fali świadczy o uszkodzeniu struktury prób dolomitowych. Wyliczony wskaźnik wietrzenia mrozowego (R_p) wynosi $4,2 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$].

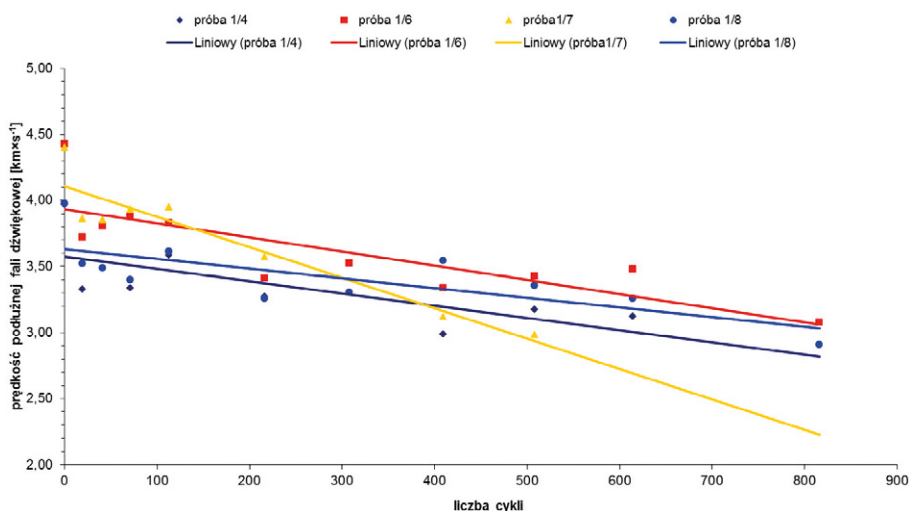
W próbach piaskowców kwarcytowych (nr 2) spadek prędkości fali ultradźwiękowej jest nieznaczny bądź nie występuje. Wartości V_p uległy spadkowi od 4,96–5,29 do 4,89–5,18 po prawie 900 cyklach gelacyjnych (ryc. 9). Wskaźnik R_p wynosi $0,2 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] i ma najniższą wartość w porównaniu do pozostałych badanych skał.

Po niemal 900 cyklach gelacyjnych, w granitach białych (nr 3) nastąpił spadek prędkości fali od 4,23–4,64 do 3,87–4,08. W granitach brązowych (nr 5) odnotowano spadek wartości parametru V_p od 4,47–4,71 do 3,88–4,09. Wskaźnik wietrzenia mrozowego dla obu badanych skał osiąga zbliżone wartości – $1,4 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] i $1,5 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] (ryc. 10, 11).

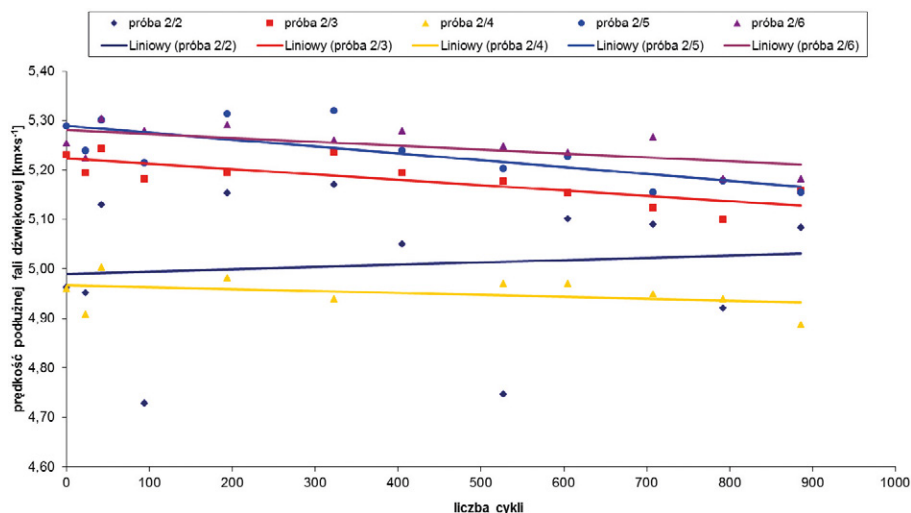
W amfibolitach (próba nr 4) po ponad 800 cyklach gelacyjnych, nastąpił słabo zauważalny spadek prędkości fali ultradźwiękowej, od 5,06–5,73 do 4,54–5,68. Wskaźnik wietrzenia mrozowego ma niskie wartości – $0,4 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] (ryc. 12).

Po symulacji ponad 800 cykli gelacyjnych, w próbach zlepieńców droбноziarnistych (nr 6) odnotowano spadek badanego parametru V_p od 4,15–5,52 do 3,46–5,29. Wskaźnik wietrzenia mrozowego wynosi $0,7 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] (ryc. 13). Próby zlepieńca wykazują znaczne różnice wartości początkowej prędkości fali ultradźwiękowej.

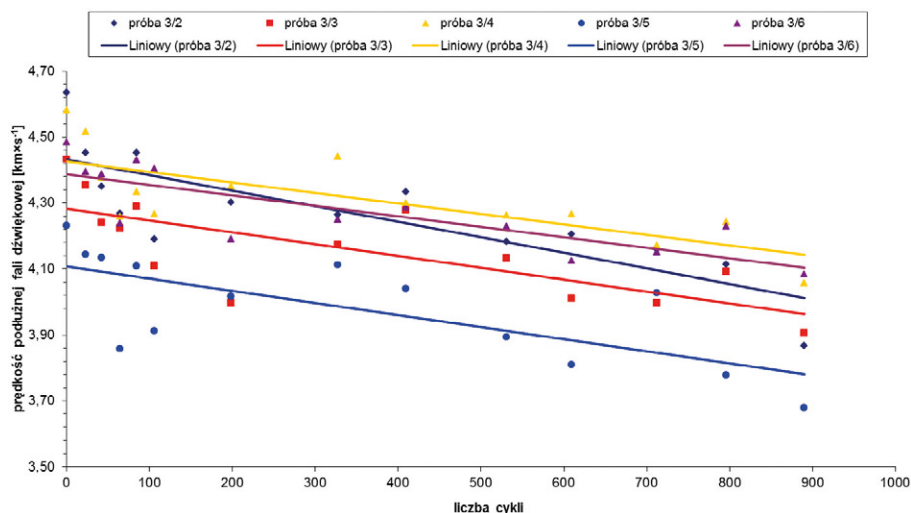
Po około 800 cyklach gelacyjnych, w wapieniach organodetrytycznych (próba nr 7) zanotowano spadek prędkości fali od 4,60–6,30 do 4,95–6,26. Wskaźnik wietrzenia mrozowego ma niską wartość, podobnie jak dla amfibolitu – $0,4 \cdot 10^{-4}$ [cykle $^{-1}$] (ryc. 14).



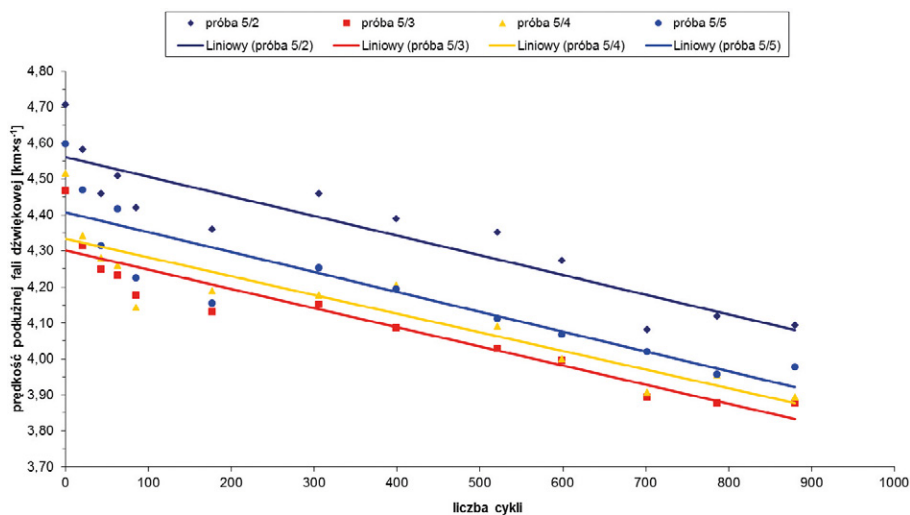
Ryc. 8. Zmiana prędkości fali ultradźwiękowej w brekcji dolomitowej w trakcie trwania eksperymentu
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in dolomite breccia, in the course of the experiment



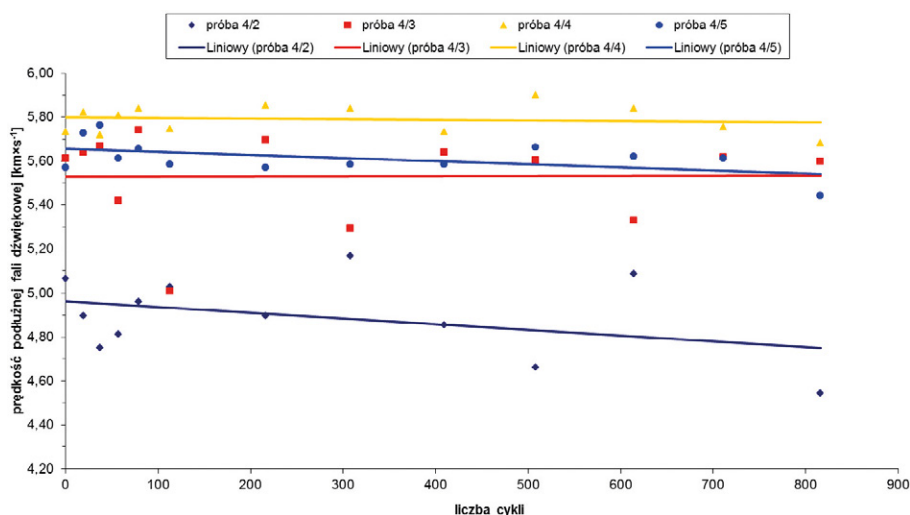
Ryc. 9. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas eksperymentu, w piaskowcu kwarcytowym
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in quartzite sandstone, in the course of the experiment



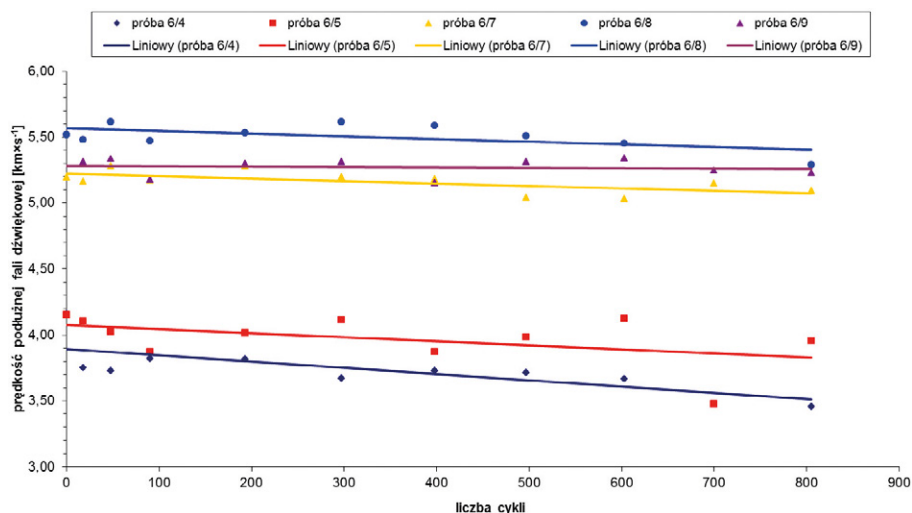
Ryc. 10. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas trwania eksperymentu, w granicie białym
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in white granite, in the course of the experiment



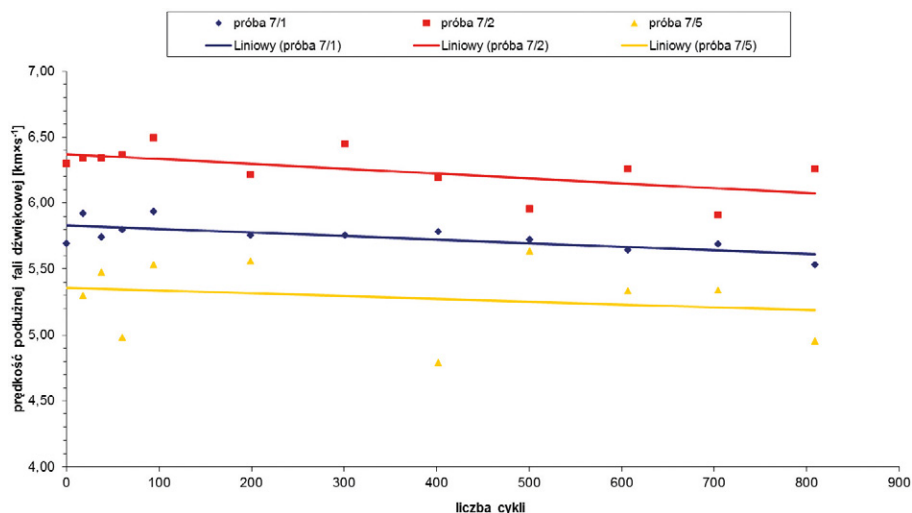
Ryc. 11. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas trwania eksperymentu, w granicie brązowym
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in brown granite, in the course of the experiment



Ryc. 12. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej w amfibolicie podczas trwania eksperymentu, w amfibolicie
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in amphibolite, in the course of the experiment



Ryc. 13. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas trwania eksperymentu, w zlepieniu drobnoziarnistym
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in fine-grained conglomerate, in the course of the experiment



Ryc. 14. Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas trwania eksperymentu, w wapieniu organodetrytycznym
Changes in the velocity of an ultrasonic wave in the organodetritite limestone, in the course of the experiment

Charakterystyka granulometryczna wytworzonej zwietrzeliny

Po zakończeniu eksperymentu laboratoryjnego z 35 prób o wadze początkowej mieszczące się w zakresie od około 160 do około 200 g uzyskano bardzo zróżnicowaną masę zwietrzeliny. Od poniżej 0,01 g do 12,86 g, co stanowiło od poniżej 0,01 do 6,80% masy prób. W próbach dolomitów i zlepieńców oraz pojedynczych próbach granitu białego i wapienia dominowała frakcja żwirowa. W pozostałych próbach przeważała frakcja piasku bądź pylasta i ilasta (tab. 4).

Tabela 4. Charakterystyka zwietrzliny wytworzonej z prób skalnych, w wyniku symulowanego wietrzenia mrozowego (II 2011–VI 2013)*Characteristics of the debris generated from rock samples as a result of simulated frost weathering (II 2011–VI 2013)*

Próba	Masa początkowa (g)	Frakcja żwirowa		Frakcja piasku		Frakcja pylasta i ilasta		Masa całkowita zwietrzliny (g)	Udział zwietrzliny w masie początkowej próby (%)
		masa (g)	udział (%)	masa (g)	udział (%)	masa (g)	udział (%)		
1/4	192,78	0,75	83,3	0,10	11,1	0,05	5,6	0,90	0,47
1/6	186,21	0,10	43,5	0,08	34,8	0,05	21,7	0,23	0,12
1/7	189,13	11,21	87,2	1,55	12,0	0,10	0,8	12,86	6,80
1/8	187,12	0,97	74,1	0,27	20,6	0,07	5,3	1,31	0,70
2/2	189,63	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
2/3	186,63	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
2/4	190,48	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
2/5	185,73	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
2/6	186,31	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
3/2	182,97	0	0	0,03	100,0	0	0	0,03	0,02
3/3	183,60	0	0	0,12	92,3	0,01	7,7	0,13	0,07
3/4	183,20	0	0	0,01	100,0	0	0	0,01	0,01
3/5	162,02	0	0	0,01	100,0	0	0	0,01	0,01
3/6	184,98	0,24	85,7	0,04	14,3	0	0	0,28	0,15
4/2	206,23	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
4/3	204,16	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
4/4	202,39	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
4/5	207,48	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
5/2	182,92	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
5/3	184,11	0	0	0,04	100,0	0	0	0,04	0,02
5/4	183,86	0	0	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
5/5	183,44	0	0	0	0	0,01	100,0	0,01	0,01
6/4	184,07	0,36	90,0	0,02	5,0	0,02	5,0	0,40	0,22
6/5	184,57	0	0	0,03	60,0	0,02	40,0	0,05	0,03
6/7	188,85	8,00	99,4	0,03	0,4	0,02	0,2	8,05	4,26
6/8	186,48	0	0	0,01	33,3	0,02	66,7	0,03	0,02
6/9	189,17	0	0	0,01	25,0	0,03	75,0	0,04	0,02
7/1	181,35	1,61	86,1	0,15	8,0	0,11	5,9	1,87	1,03
7/2	156,31	0	0	0,02	16,7	0,10	83,3	0,12	0,08
7/5	184,98	0,04	14,8	0,09	33,3	0,14	51,9	0,27	0,15
7/7	179,73	0	0	0,12	42,9	0,16	57,1	0,28	0,16

Po przeprowadzeniu 816 symulowanych cykli gelacyjnych, największą masę zwietrzliny uzyskano z próby dolomitowej nr 1/7 – 12,86 g. Masa zwietrzliny z pozostałych prób dolomitowych mieściła się w przedziale od 0,23 do 1,31 g. Udział procentowy masy zwietrzliny w początkowej masie próby stanowił od 0,12 do 6,80%. Z prób dolomitowych wytworzona została zwietrzlina o dominującej frakcji żwirowej (do ponad 87%), najmniejszy udział stanowiła frakcja pylasta i ilasta (tab. 4, ryc. 15).

Po 886 cyklach gelacyjnych z prób piaskowca kwarcytowego (nr 2) oraz po 816 cyklach z prób amfibolitu (nr 4) utworzyła się zwietrzlina o masie nie przekraczającej 0,01 g (tab. 4, ryc. 15).





Ryc. 15. Stan wybranych prób skalnych przed rozpoczęciem eksperymentu (a), po zakończeniu symulacji wietrzenia (b) oraz obraz powstałej zwietrzliny (c)

Condition of selected rock samples prior to the onset of the experiment (a), and after completing the frost-weathering simulation (b). Also a picture of the resulting weathering

Po 880–890 cyklach gelacyjnych, z prób granitów tatrzańskich uzyskano nieznaczna masę zwietrzliny, od poniżej 0,01 do maksymalnie 0,28 g. Więcej zwietrzliny utworzyło się z granitów białych niż granitów brązowych. Procentowy udział zwietrzliny w masie początkowej granitowych prób skalnych mieścił się w zakresie od 0,01 do 0,15. Z próby nr 3/6 uzyskano najwięcej zwietrzliny. Dominowała frakcja piaszkowa, a w przypadku próby 3/6 frakcja żwirowa, stanowiąca 85,7% masy zwietrzliny (tab. 4, ryc. 15).

Po 805 cyklach gelacyjnych z prób zlepieńca drobnoziarnistego utworzyło się od 0,03 do 8,05 g zwietrzliny. Najwięcej zwietrzliny uzyskano z próby nr 6/7. Udział procentowy zwietrzliny w masie początkowej badanych prób wynosił od 0,02 do 4,26%. W próbach, z których powstała nieznaczna masa zwietrzliny (6/5, 6/8 i 6/9) dominowała frakcja pylista i ilasta bądź udział frakcji pylastej i ilastej oraz frakcji piasku był zbliżony. W przypadku prób, z których uzyskano większą masę zwietrzliny (6/4, 6/7) wyraźnie dominowała frakcja żwirowa (tab. 4, ryc. 15).

Po 809 cyklach gelacyjnych z wapieni organodetrytycznych powstało od 0,12 do 1,87 g zwietrzeliny. Najwięcej zwietrzeliny uzyskano z próby nr 7/1, w której zwietrzelina stanowiła około 1% masy początkowej próby. W zwietrzelinie z próby 7/1 dominowała frakcja żwirowa (tab. 4, ryc. 15). W przypadku wapieni i zlepieńców, wzdłuż spękań i płaszczyzn łupliwości zachodziło rozpuszczanie. W jego wyniku wytrącane były kationy wapnia i magnezu oraz aniony chlorkowe i siarczanowe (VI).

Wskaźnik wietrzenia mrozowego

Na podstawie wyliczonego wskaźnika wietrzenia mrozowego R_f (tab. 5) najmniejszą odporność na wietrzenie mrozowe ma brekcja dolomitowa. Kolejno, do skał o coraz większej odporności należą granity, zlepieniec drobnoziarnisty, wapień organodetrytyczny, amfibolit. Skałą o najmniejszej podatności na wietrzenie mrozowe jest piaskowiec kwarcytowy.

Kierując się procentowym udziałem wytworzonej zwietrzeliny w stosunku do masy początkowej badanych prób (tab. 5), najmniejszą odporność ma również brekcja dolomitowa. Stopniowo coraz większą odpornością odznaczają się zlepieniec drobnoziarnisty, wapień organodetrytyczny, granity, amfibolit. Najmniejszą podatność na wietrzenie mrozowe ma piaskowiec kwarcytowy.

Tabela 5. Wartość wskaźnika R_f i procentowy udział wytworzonej zwietrzeliny dla badanych typów skał
The value of the R_f index and percentage of generated weathering for the studied types of rock

Wskaźnik	Jednostka	Dolomit	Piaskowiec kwarcytowy	Granit biały	Amfibolit	Granit brązowy	Zlepieniec	Wapień
R_f	$\cdot 10^{-4}$ [cykle ⁻¹]	4,2	0,2	1,4	0,4	1,5	0,7	0,4
Udział wytworzonej zwietrzeliny	%	0,12–6,80	< 0,01	0,01–0,15	< 0,01	< 0,01–0,02	0,02–4,26	0,08–1,03

Podsumowanie

Badane skały zachodnio tatrzańskie odznaczają się małą podatnością na wietrzenie mrozowe. Do najmniej odpornych skał należy brekcja dolomitowa. Przeprowadzone analizy cech fizycznych skał pozwoliły na wyróżnienie cech odpowiedzialnych za dużą odporność badanych skał. Skały odznaczają się małą porowatością otwartą, dla wszystkich typów skał poniżej 5%. Niewielkie spękanie prób skalnych w stanie wyjściowym, wypełnienie istniejących porów spoiwem, głównie w piaskowcach i zlepieńcach oraz wtórne zablźniaczenie spękań w wapieniach, ogranicza możliwości wnikania wody do wnętrza skał. Badane skały zachodnio tatrzańskie charakteryzują się bardzo małą nasiąkliwością. Do właściwości fizycznych skał, które wpływają na ich dużą odporność, należą ponadto duża wytrzymałość, szczególnie w piaskowcu i zlepieńcu, duży udział w składzie mineralnym skał kwarcu oraz zwięzłość i często monomineralność skał.

Kwestia zapełnienia porów spoiwem jest bardziej złożona. Jeżeli spoiwo bądź wypełnienie spękań jest węglanowe, kalcytowe, wówczas z upływem czasu zostaje ono rozpuszczone i wówczas działanie wietrzenia mrozowego jest ułatwione. Widać to na przykładzie zlepieńca drobnoziarnistego i wapienia organodetrytycznego. W przypadku spoiwa ilastego lub cementu kwarcowego, nie dochodzi do rozpuszczania. Wypełnienie spoiwem pustek w skale utrudnia wnikanie w nią wody i tym samym ogranicza oddziaływanie wietrzenia mrozowego. Taką sytuację obserwujemy na przykładzie piaskowca kwarcytowego.

Nie zaobserwowano wpływu kierunkowości tekstury na odporność skały na wietrzenie mrozowe, natomiast istotna jest obecność w skale spoiwa węglanowego i fragmentów skał węglanowych, które ulegają systematycznemu rozpuszczaniu, co stwarza dogodniejsze warunki dla działania wietrzenia fizycznego. W przypadku badanych granitów i amfibolitów, istotny wpływ na przebieg wietrzenia mrozowego, wydaje się mieć obecność w składzie mineralnym miki i chlorytu. Minerale te ulegają wykruszaniu ze skały w pierwszej kolejności, powiększając pustki w skale. Ponadto, w wyniku oddziaływania wietrzenia mrozowego, następuje poszerzanie przestrzeni między blaszkami miki i chlorytu.

Dokonywane, w trakcie trwania symulacji wietrzenia, obserwacje stanu prób skalnych, ukazały jak zróżnicowany jest sposób rozpadu poszczególnych skał. W skałach węglanowych rozpad następuje cały czas, wspomagany rozpuszczaniem skały. Odpadają nieregularne, ostre odłamki, które stopniowo, z upływem czasu ulegają dalszemu rozpadowi. Obecność w składzie mineralnym skał fragmentów węglanów lub spoiwa węglanowego, odgrywa bardzo istotną rolę w rozpadzie skał. Wpływ ten był widoczny na przykładzie amfibolitów, a także zlepieńców.


Wpływ tekstury na rozpad skał nie został zaobserwowany, natomiast występowanie żył mineralnych w skale, determinuje ich sposób rozpadu, jak to miało miejsce w poszczególnych próbach zlepieńców drobnoziarnistych.

Warto zwrócić uwagę, że bez względu na zastosowany wskaźnik odporności na wietrzenie mrozowe, poszczególne typy skał są uszeregowane w jednakowej kolejności, za wyjątkiem granitów. Na podstawie wskaźnika R_f granity tatrzańskie mają mniejszą odporność niż na to wskazuje ilość wytworzonej zwietrzliny podczas trwania symulacji wietrzenia mrozowego (tab. 7).

Skały granitowe, w zależności od zastosowanego wskaźnika oddziaływania wietrzenia mrozowego, zajmują różne miejsce w zaprezentowanym w rozprawie „szeregu od-

Tabela 7. Typy badanych skał uszeregowane pod względem odporności na wietrzenie mrozowe na podstawie różnych wskaźników

Types of studied rock ranked in terms of resistance to frost-weathering based on various indicators

Odporność	Wskaźnik wietrzenia mrozowego R_f	Udział wytworzonej zwietrzliny w początkowej masie próby skalnej (%)
	dolomit	dolomit
	granit brązowy	zlepieniec
	granit biały	wapień
	zlepieniec	granit brązowy
	wapień	granit biały
	amfiboli	amfiboli
	piaskowiec	piaskowiec

porności” badanych skał zachodnio tatrzańskich (tab. 7). Pomiarów zmian prędkości fali ultradźwiękowej pozwalają na wnioskowanie, że przez dłuższy czas zachodzi stopniowe uszkodzanie struktury skał, któremu nie towarzyszą wyraźne zmiany makroskopowe. Można spodziewać się, iż większa liczba cykli gelacyjnych doprowadziłaby do znacznego rozpadu skały na drobnoziarnistą zwietrzelinę. W przeciwieństwie do piaskowców kwarcytowych i amfibolitów, w przypadku których nic nie wskazuje, aby nastąpiło przyspieszenie rozpadu skały.

Duże zróżnicowanie, nawet w obrębie niewielkiego fragmentu ściany skalnej, jest znacznym utrudnieniem w prowadzeniu badań skał i formułowaniu ogólnych wniosków. Zaprezentowane w pracy wyniki badań należy zatem odnosić do konkretnych typów skał o scharakteryzowanych uprzednio właściwościach fizycznych.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Baranowska J., Garbiak M., 1999, *Badania ultradźwiękowe*, Politechnika Szczecińska, Szczecin.
- Bland W., Rolls D., 1998, *Weathering: An Introduction to the Scientific Principles*, University Press, Oxford, New York.
- Chen T.C., Yeung M.R., Mori N., 2004, *Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action*, Cold Regions Science and Technology, 38, s. 127–136.
- Chrzan T., 1994, *Ultradźwiękowe badania właściwości skał i materiałów budowlanych*, Wyd. Politechnika Wrocławska, Wrocław.
- Klimaszewski M., 1988, *Rzeźba Tatr Polskich*, Wyd. PWN, Warszawa.
- Matsuoka N., 1990, *Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach*, Cold Regions Science and Technology, 17, 3, s. 253–270.
- Migoń P., 2006, *Geomorfologia*, Wyd. PWN, Warszawa.
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003, *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 5, Kraków, s. 29–32.
- Rączkowska Z., 2007, *Współczesna rzeźba peryglacialna wysokich gór Europy*, Prace Geograficzne PAN, Warszawa.
- Siwicki M. (red.), 2005, *Praktyczny atlas Tatr polskich i słowackich*, Wyd. Sygnatura.
- Tricart J., 1960, *Prace doświadczalne w zakresie zagadnienia wietrzenia mrozowego*, [w:] J. Tricart (red.), *Zagadnienia geomorfologiczne*, Wyd. PWN, Warszawa, s. 201–234.
- Witt A., Borówka R.K., 1997, *Wielka Encyklopedia Geografii Świata. Rzeźba powierzchni Ziemi*, 4, Wyd. Kurpisz, Poznań, s. 91–100.

Summary

The aim of the work described here was to determine the rate of frost weathering for selected types of rock, and the manner in which this proceeds. The authors attempts to answer questions regarding progress with the disintegration of a given type of rock

over time; the size and shape of weathered grains; the role played by fissures in rock and rock texture; and further relevant properties like compressive and tensile strength, porosity and water absorption.

The rock samples used in laboratory testing were collected in the catchment area of the Chochołowski Stream in the Western Tatra Mountains of Poland. The seven types of rock analysed were white and brown granite, organodetritic limestone, fine-grained conglomerate, dolomite breccia, quartzite sandstone and amphibolite. Samples were subjected to simulated frost weathering via the impact of repeated thermal cycles across a temperature range of -5 to +10°C. The simulation was carried out at the Low Temperatures Laboratory of the Institute of Geography and Spatial Management of Kraków's Jagiellonian University, using a CI/1400/LT/2D cooling device. As testing was in progress, changes in the states of samples were determined through the measurement of dry and saturated mass and water absorption, as well as the speed at which an ultrasonic wave passed through. By reference to results for these measures, it was possible to calculate the frost weathering index after Matsuoke, i.e.:

$$Rf = (V_{p0} - V_{pk}) / (V_{p0} * k) \text{ [cykle}^{-1}\text{]},$$

where V_{p0} is wave speed at cycle 0 (in km/s), V_{pk} is wave speed at cycle k (km/s) and k is the number of cycles. Rock dissolution tests and measurements of the products of weathering were also carried out.

Values obtained for the index were used to rank the rocks tested for their resistance to frost weathering, as was the percentage of material in the initial mass that became subject to rock weathering. The least-resistant rock proved to be dolomite breccia, and the most-resistant amphibolites and quartzite sandstones. The rankings of other rocks varied in line with the indicative parameter referred to.

The testing of physical properties suggested several reasons for high resistance to frost weathering among the analysed types of rock from the Western Tatras, i.e. the limited (<5%) open porosity noted for all types, limited water absorption, high compressive and tensile strength, compactness and homogeneity, low densities of fissures in samples in their initial state, almost complete filling of pores with matrix (e.g. in sandstone and conglomerate), re-filling of cracks (e.g. in limestone), and a significant component of resistant quartz. No effect of rock texture on resistance to frost weathering could be observed, but the presence of carbon matrix and carbonate rock fragments is important. The latter dissolve steadily, creating more favourable conditions for physical weathering (e.g. of amphibolites and conglomerates). The occurrence of mineral veins within rocks determines disintegration routes (e.g. in conglomerates).

Given that rocks were subjected to an average of 850 repeated thermal cycles in the laboratory, the simulation achieved was of approx. 50 years of frost weathering under natural conditions in the study area. Experiments of this kind thus offer insight into processes running very slowly under natural conditions.